DOI: 10.24892/RIJIE/20260311

Математическое моделирование теплозащитных свойств многослойных текстильных изделий для арктических условий*

Яшин С.Р., Баранов И.В.
Университет ИТМО
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
yashins27@mail.ru, barigor@mail.ru

Аннотация. **Существующие стандартные методы оценки теплозащитных свойств экипировки для арктических условий не учитывают одновременное влияние механического сжатия, увлажнения и ветра, что приводит к завышению реальной эффективности изделий. Целью настоящей работы разработка математической модели, прогнозирующей нестационарное температурное поле в многослойной перчатке с учётом совокупного воздействия указанных эксплуатационных факторов. Модель строится на сопряжённой системе уравнений теплопроводности (с учётом теплоты фазовых переходов влаги), влагопереноса в пористой среде и квазистатического механического равновесия. Впервые предложен мультипликативный подход к описанию эффективной теплопроводности как функции деформации, влагосодержания и температуры, основанный на обобщении экспериментальных данных. Для замыкания системы введены определяющие соотношения: гиперупругая модель Муни–Ривлина для больших деформаций утеплителя, эмпирические зависимости коэффициентов влагопроводности и контактного теплового сопротивления от давления, критериальные уравнения для конвективного тепло- и массообмена на внешней поверхности с учётом ветра. Модель служит основой для создания цифрового двойника теплозащитной перчатки и позволяет перейти от эмпирического проектирования к научно обоснованной оптимизации экипировки для экстремальных климатических условий.**

***Ключевые слова*: математическое моделирование, теплозащитные свойства, многослойные текстильные материалы, арктические условия, тепломассоперенос.**

Введение

При проектировании защитной экипировки для работы в условиях Арктики определяющее значение имеет способность изделия сохранять тепловой комфорт при одновременном воздействии низких температур, ветра, влаги и механических нагрузок. Стандартные методы оценки теплозащитных свойств, основанные на испытаниях плоских образцов в стационарных условиях, не учитывают изменения теплофизических характеристик материалов под действием сжатия, увлажнения и конвективного теплообмена, вызванного ветром. Как следствие, реальная эффективность готового изделия может существенно отличаться от лабораторных показателей [1, 2].

В настоящей работе предлагается математическая модель, позволяющая прогнозировать нестационарное температурное поле в многослойной перчатке с учётом совокупного влияния трёх основных эксплуатационных факторов:
- механической деформации (сжатия при захвате инструмента);
- увлажнения (внутреннее потоотделение и внешняя влага);
- ветрового воздействия.

Модель строится на базе фундаментальных законов сохранения энергии и массы, дополненных эмпирическими зависимостями, параметры которых определяются из лабораторных экспериментов. Такой подход позволяет перейти от статического описания свойств материалов к их динамической параметризации в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

1. Геометрия и основные допущения

Расчётная область будет представлять собой трёхмерную многослойную оболочку, повторяющую форму кисти человека. Для упрощения и возможности верификации на первом этапе используется осесимметричная модель цилиндра, имитирующего палец. Система состоит из трёх характерных слоёв:
- внутренний гигроскопичный слой (подкладка);
- средний пористый теплоизоляционный слой (утеплитель);
- внешний ветро- и влагозащитный слой (мембранная ткань).

При построении модели принимаются следующие допущения:

1) Материалы каждого слоя изотропны в плоскости слоя, их свойства могут изменяться только по толщине;

2) Теплофизические характеристики являются функциями локальной деформации, влагосодержания и температуры; зависимость от этих факторов имеет мультипликативный характер, что подтверждено экспериментами для волокнистых материалов [3];

3) Фазовые переходы влаги (испарение–конденсация) происходят в локальном термодинамическом равновесии, скорость испарения ограничивается диффузией пара;

4) Перенос тепла излучением внутри материала пренебрежимо мал ввиду его оптической толщины;

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг", https://icie-rus.org

5) Механическая диссипация энергии при квазистатической нагрузке не учитывается; вклад вязких потерь становится заметным только при быстрых циклических деформациях [4].

2. Система уравнений тепломассопереноса и механики деформируемой среды

2.1. Уравнение теплопроводности (энергии)

Основой тепловой модели служит дифференциальное уравнение теплопроводности, вытекающее из закона сохранения энергии в сплошной среде. В нашем случае таким источником является теплота фазовых переходов влаги, а также, возможно, механическая диссипация. Для каждого слоя i (i=1…N) уравнение принимает вид:

$$\rho_i\, c_{p,i}\, \frac{\partial T_i}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\lambda_{\mathrm{eff},i}\, \nabla T_i\right) - L_v\, \frac{\partial w_i}{\partial t}, \qquad (2.1)$$

Член $-L_v \partial w_i/\partial t$ описывает сток тепла при испарении ($\partial w_i/\partial t < 0$) или его выделение при конденсации. Подобная форма широко используется в задачах тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах [5, 12] и подтверждена экспериментально для текстильных материалов [1].

2.2. Уравнение влагопереноса (массоперенос)

Влага в пористых текстильных материалах может находиться в двух формах: в виде связанной воды (абсорбированной волокнами) и свободной воды (заполняющей поры). Перенос влаги происходит за счёт диффузии (под действием градиента влагосодержания) и конвекции (вместе с движущейся твёрдой фазой при деформации). Кроме того, внутри объёма могут действовать источники влаги (потоотделение на внутренней границе) и стоки (испарение). Уравнение неразрывности для влаги в пористой среде в упрощённой форме имеет вид:

$$\frac{\partial\left(\rho_{\mathrm{dry},i}\, w_i\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_{\mathrm{dry},i}\, w_i\, u_i\right) = \nabla \cdot \left(D_i\, \nabla w_i\right) + S_{\mathrm{gen},i} - S_{\mathrm{evap},i}. \qquad (2.2)$$

2.3. Уравнение механического равновесия (деформация)

При эксплуатации перчатки её материалы испытывают сложное напряжённо-деформированное состояние: сжатие в зоне контакта с инструментом, изгиб в суставах пальцев, растяжение на тыльной стороне. Для расчёта поля деформаций необходимо решить уравнения равновесия сплошной среды. В предположении квазистатического нагружения (скорости движения малы, инерционными членами можно пренебречь) уравнение движения сводится к условию равновесия [9]:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_i + \boldsymbol{f}_b = 0, \qquad (2.3)$$

где $\boldsymbol{\sigma}_i$– тензор напряжений Коши в i-м слое (Па), $\boldsymbol{f}_b$ – вектор объёмных сил (например, силы тяжести). Для большинства инженерных задач, связанных с одеждой, $\boldsymbol{f}_b$ пренебрежимо мало по сравнению с контактными усилиями.

Чтобы замкнуть систему, необходимо задать определяющее соотношение, связывающее напряжения с деформациями. Выбор модели зависит от величины деформаций и механических свойств материала, мы рассмотрим их подробнее в следующем разделе.

3. Определяющие соотношения

Для корректного описания связанных процессов тепломассопереноса в деформируемой многослойной текстильной системе необходимо задать зависимости теплофизических и механических свойств материалов от основных влияющих факторов: деформации, влагосодержания, температуры и внешних климатических условий. В настоящем разделе описаны определяющие соотношения, полученные на основе обобщения экспериментальных данных, представленных в научной литературе по текстильному материаловедению и теплофизике пористых сред.

3.1. Эффективная теплопроводность как функция состояния

Теплопроводность капиллярно-пористых материалов не является постоянной величиной, а существенно зависит от их структурного состояния [7,13]. Для волокнистых текстильных материалов основными факторами, определяющими эффективную теплопроводность, являются степень сжатия (деформация), влагосодержание и температура. На основании анализа экспериментальных данных, представленных в работах [3–6], в настоящей работе предлагается мультипликативная модель эффективной теплопроводности, которая имеет следующий вид:

$$\lambda_{\mathrm{eff},i}(\varepsilon_i, w_i, T_i) = \lambda_{\mathrm{dry},i}(T_i) \cdot f_{\mathrm{def}}(\varepsilon_i) \cdot f_{\mathrm{moist}}(w_i) \cdot f_{\mathrm{temp}}(T_i), \qquad (3.1)$$

где $\lambda_{\mathrm{dry},i}(T_i)$ – теплопроводность абсолютно сухого недеформированного материала, определяемая экспериментально. Выбор мультипликативной формы обоснован физической независимостью механизмов, определяющих влияние каждого из факторов: деформация изменяет структурную пористость материала и количество контактов между волокнами, влажность замещает воздух в порах водой, имеющей значительно более высокую теплопроводность, а изменение температуры влияет на теплопроводность как твёрдой фазы, так и газовой составляющей.

Влияние деформации

При сжатии волокнистого материала происходит уменьшение его пористости и увеличение числа контактов между волокнами, что приводит к росту эффективной теплопроводности. На основе обобщения экспериментальных данных [7, 8] предлагается следующая аппроксимирующая функция:

$$f_{\mathrm{def}}(\varepsilon_i) = 1 + \alpha_{1,i}\varepsilon_i + \alpha_{2,i}\varepsilon_i^2. \qquad (3.2)$$

Влияние влагосодержания

Процесс увлажнения текстильных материалов приводит к замещению воздуха в порах водой, теплопроводность которой (λ_{water}≈0,6 Вт/(м·К) при 20°С) значительно превышает теплопроводность воздуха (λ_{air}≈0,026 Вт/(м·К)) [10]. Кроме того, при высоком влагосодержании возникает дополнительный капиллярный перенос тепла, что приводит к нелинейному росту эффективной теплопроводности с увеличением влажности. На основе анализа экспериментальных данных, представленных в работах [3, 9, 12–14], в настоящей работе предлагается следующая функция влияния влажности:

$$f_{\mathrm{moist}}(w_i) = 1 + \beta_{1,i}w_i + \beta_{2,i}w_i^2 + \beta_{3,i}\exp\left(\beta_{4,i}w_i\right), \qquad (3.3)$$

Температурная зависимость теплопроводности

Теплопроводность текстильных материалов изменяется с температурой вследствие изменения теплопроводности как твёрдой фазы (волокон), так и газовой составляющей (воздуха в порах). Как показано в работе Sukigara S. [12], в диапазоне температур от –40 до +40°С эта зависимость может быть аппроксимирована квадратичной функцией:

$$f_{\mathrm{temp}}(T_i) = 1 + \gamma_{1,i}(T_i - T_0) + \gamma_{2,i}(T_i - T_0)^2, \quad T_0 = 293\ \mathrm{K}. \qquad (3.4)$$

3.2. Коэффициент влагопроводности

Перенос влаги в текстильных материалах определяется сложным сочетанием диффузионных и капиллярных механизмов. Как показано в работе Fohr J.P. et. al. [13], коэффициент влагопроводности существенно зависит от структурного состояния материала, влагосодержания и температуры. На основе обобщения экспериментальных данных [18, 19] предлагается следующее эмпирическое соотношение:

$$D_i(\varepsilon_i, w_i, T_i) = D_{0,i} \cdot \exp(-\eta_i \varepsilon_i) \cdot (1 + \theta_i w_i) \cdot \exp\left(-\frac{E_{a,i}}{RT_i}\right), \quad (3.5)$$

Источники и стоки влаги

Генерация влаги $S_{\text{gen},i}$ локализована во внутреннем слое (на границе с рукой). Она задаётся как граничное условие второго рода [4, 17]:

$$-D_i \partial n \partial w_i = g_{sw}(t),$$

3.3. Механические свойства материалов

Утеплители и трикотажные ткани могут сжиматься на 30–50% от исходной толщины. В этом случае линейная модель становится непригодной. Для описания поведения таких материалов широко использована гиперупругая модель, основанная на представлении о функции энергии деформации Ψ:

$$\boldsymbol{\sigma_i} = \frac{2}{J_i} \boldsymbol{F_i} \cdot \frac{\partial \Psi_i}{\partial \boldsymbol{C_i}} \cdot \boldsymbol{F_i^T} + p_i \boldsymbol{I},$$

Одной из наиболее популярных моделей для резиноподобных и волокнистых материалов является модель Муни–Ривлина [22, 23]. В двухпараметрической форме для изотропных материалов она записывается как:

$$\Psi_i = C_{10,i}(I_1 - 3) + C_{01,i}(I_2 - 3) + \frac{1}{D_{1,i}}(J_i - 1)^2, \quad (3.6)$$

где I_1, I_2 – первый и второй инварианты тензора деформаций Коши–Грина

$$I_1 = tr(\boldsymbol{C_i}), \quad I_2 = \frac{1}{2}\left[(tr\boldsymbol{C_i})^2 - tr(\boldsymbol{C_i^2})\right];$$

$C_{10,i}$, $C_{01,i}$ – материальные константы, характеризующие сопротивление сдвигу (Па); $D_{1,i}$ – параметр сжимаемости (чем больше $D_{1,i}$, тем легче материал сжимается по объёму).

Материальные константы $C_{10,i}$, $C_{01,i}$ и $D_{1,i}$ определяются из калибровки по данным одноосного сжатия [24].

3.4. Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи на внешней поверхности

Ветровое воздействие на внешней поверхности перчатки описывается через коэффициенты конвективной теплоотдачи и массоотдачи, которые являются функциями скорости ветра, геометрии изделия и состояния поверхности.

Коэффициент теплоотдачи

Для расчёта коэффициента теплоотдачи при вынужденной конвекции используется критериальное уравнение, основанное на теории пограничного слоя [25]. В общем виде для турбулентного режима обтекания (характерного для скоростей ветра 5–20 м/с) справедлива степенная зависимость:

$$h(V, \varepsilon_N) = h_0 + C \cdot V^m \cdot (1 + k_\varepsilon \varepsilon_N) \quad (3.7)$$

Коэффициент массоотдачи

Коэффициент массоотдачи β связан с коэффициентом теплоотдачи h через аналогию Льюиса, которая для воздуха имеет вид:

$$\beta(V, \varepsilon_N) = \frac{h(V, \varepsilon_N)}{\rho_{\text{air}}\, c_{p,\text{air}}\, \text{Le}^{2/3}}, \qquad \text{Le} \approx 0.85. \quad (3.8)$$

3.5. Контактное тепловое сопротивление между слоями

При контакте двух слоёв перчатки реальная площадь соприкосновения всегда меньше номинальной вследствие шероховатости поверхностей. Это приводит к возникновению дополнительного термического сопротивления на границе раздела, которое зависит от прижимного давления и свойств контактирующих материалов. В настоящей работе предлагается использовать следующую зависимость:

$$R_{\text{cont},i}(p) = R_{\text{cont},0,i}\left(1 + \frac{p_0}{p}\right)^{-n}, \qquad n \approx 0.5 \ldots 1.0. \quad (3.9)$$

3.6. Количественная оценка эффективной теплопроводности как функции состояния

Для количественной оценки совместного влияния факторов проанализируем поведение мультипликативной модели (3.1) при типичных для эксплуатации значениях. Рассмотрим состояние материала утеплителя, характеризуемое деформацией сжатия ε и объёмным влагосодержанием w. Из соотношений (3.2) и (3.3) следует, что каждый из факторов даёт собственный нелинейный вклад в рост эффективной теплопроводности и, как следствие, в падение теплового сопротивления R.

Чистое сжатие на 30 % (ε = 0,3) в сухом состоянии увеличивает λ за счёт роста числа контактов между волокнами, что приводит к снижению R примерно на 25–40 % (в зависимости от значений эмпирических коэффициентов α_1, α_2, определённых экспериментально для конкретного утеплителя). Изолированное увлажнение до w = 0,5 в недеформированном состоянии также ведёт к падению R – ориентировочно на 30-40 %, вследствие заполнения пор водой.

Однако прямое арифметическое или даже вероятностное суммирование этих потерь недооценивает реальную деградацию. Как показано на рис. 1, совместное действие сжатия (ε = 0,3) и увлажнения (w = 0,5) вызывает падение теплового сопротивления на 55–60 %.

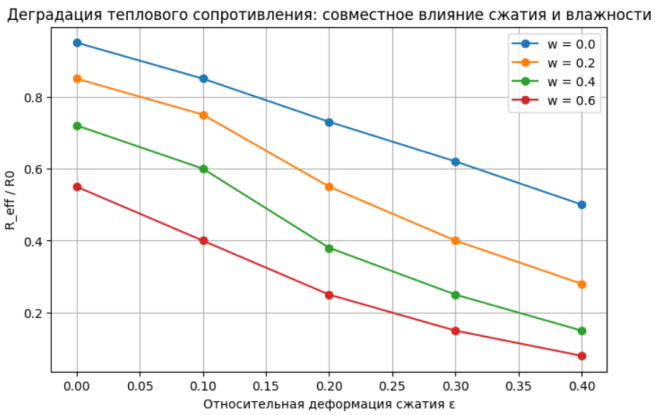

Рис. 1. График деградации теплового сопротивления (совместное влияние сжатия и влажности)

Этот неаддитивный, синергетический эффект объясняется изменением структуры порового пространства: сжатие уменьшает характерный размер пор, и вода, которая в недеформированном материале находилась в виде отдельных капель, начинает заполнять сплошные каналы, создавая «мостики холода». Это отражается во взаимодействии функций $f_{def}(\varepsilon)$ и $f_{moist}(w)$, произведение которых даёт значительно больший рост λ, чем сумма их индивидуальных приращений.

4. Граничные условия

Для замыкания системы (2.1)–(2.3) с определяющими соотношениями (3.1)–(3.9) задаются граничные условия на внутренней, межслойных и внешней поверхностях расчётной области.

4.1. Внутренняя граница (контакт с рукой)

На внутренней поверхности Γ_{inner} температура поддерживается постоянной за счёт терморегуляции организма:

$$T(\boldsymbol{x},t) = T_{\text{hand}} = \text{const}, \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{inner}}, \tag{4.1}$$

Поток влаги от потоотделения задаётся условием Неймана:

$$-D_i \frac{\partial w_i}{\partial n} = g_{\text{sw}}(t), \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{inner}}, \tag{4.2}$$

где $g_{\text{sw}}(t)$ – интенсивность потоотделения (кг/(м²·с)).

Согласно физиологическим данным [21], интенсивность потоотделения может варьироваться в широких пределах: от 0 (состояние покоя) до 50 г/(м²·ч) (тяжёлая физическая работа).

4.2. Границы раздела между слоями

На контакте слоёв i и i+1 (поверхность Γ_{int}) предполагается непрерывный тепловой контакт:

$$T_i = T_{i+1}, \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{int}},$$

$$-\lambda_{\text{eff},i} \frac{\partial T_i}{\partial n} = -\lambda_{\text{eff},i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial n}, \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{int}}. \tag{4.3}$$

При наличии зазоров или шероховатости контактирующих поверхностей возникает дополнительное термическое сопротивление. В этом случае вместо (4.3) используется условие с температурным скачком:

$$T_{i+1} - T_i = R_{\text{cont}} \left(-\lambda_{\text{eff},i} \frac{\partial T_i}{\partial n}\right), \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{int}}, \tag{4.4}$$

где R_{cont} задается формулой (3.9). Для влаги на межслойных границах принимается непрерывность влагосодержания и потока, если слои не разделены паронепроницаемой мембраной.

4.3. Внешняя граница (поверхность перчатки)

Внешняя поверхность перчатки взаимодействует с окружающей средой, которая характеризуется низкой температурой (до –40°C и ниже), ветром, влажностью воздуха и возможными осадками. Суммарный тепловой поток на внешней границе складывается из нескольких составляющих:

$$-\lambda_{\text{eff},N} \frac{\partial T_N}{\partial n} = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} + q_{\text{evap}} + q_{\text{precip}}, \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{outer}}. \tag{4.5}$$

Конвективный теплообмен (ветер)

Конвективный поток тепла описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$q_{\text{conv}} = h(V, \varepsilon_N, T_N) \cdot (T_N - T_{\text{air}}), \tag{4.6}$$

$$h = 5 + 3.5V^{0.8}, \tag{4.8}$$

где V – скорость ветра в м/с. Эта формула справедлива для диапазона $0<V<20$ м/с и даёт погрешность не более 15% по сравнению с экспериментальными данными [25]. В настоящей работе предпочтение отдаётся более общей зависимости (3.7), учитывающей также деформацию поверхности.

Радиационный теплообмен

Теплообмен излучением между поверхностью перчатки и окружающими предметами (земля, снежный покров, небо) описывается законом Стефана–Больцмана:

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon_s \sigma \left(T_N^4 - T_{\text{sky}}^4\right), \tag{4.9}$$

где ε_s – степень черноты внешней поверхности перчатки (безразмерная, $0 < \varepsilon_s < 1$); σ=5.67×10⁻⁸ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана; T_{sky} – эффективная температура неба (К).

В ясную погоду эффективная температура неба может быть на 10–20 К ниже температуры воздуха у поверхности, в пасмурную – приближается к T_{air}. Наиболее часто используемая эмпирическая формула:

$$T_{\text{sky}} = T_{\text{air}}(0.711 + 0.0056T_d + 0.000073T_d^2)^{1/4}, \tag{4.10}$$

где T_d – температура точки росы (°C).

Испарительное охлаждение

Испарение влаги с поверхности перчатки приводит к дополнительному отводу тепла. Плотность потока тепла, связанного с испарением, выражается через массоотдачу:

$$q_{\text{evap}} = L_v\, \beta(V, \varepsilon_N) \left(\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}\right), \tag{4.11}$$

где $\rho_{v,\infty}$ – плотность водяного пара в окружающем воздухе (кг/м³), определяется через относительную влажность φ и температуру воздуха:

$$\rho_{v,\infty} = \varphi\, \rho_{v,\text{sat}}(T_{\text{air}}), \tag{4.12}$$

где $\rho_{v,\text{sat}}(T_{\text{air}})$ – плотность насыщенного пара при температуре воздуха. В арктических условиях абсолютная влажность воздуха очень мала, поэтому $\rho_{v,\infty}$ часто пренебрежимо мало по сравнению с $\rho_{v,s}$. Однако при высокой относительной влажности (туман, снегопад) учёт $\rho_{v,\infty}$ становится необходимым.

Тепловой эффект от осадков

При попадании на поверхность перчатки снега или дождя часть тепла расходуется на нагрев осадков до температуры поверхности и, возможно, на плавление снега. В первом приближении этот эффект можно учесть следующим образом:

$$q_{\text{precip}} = \dot{m}_{\text{precip}} \left[c_w (T_{\text{melt}} - T_N) + L_f \cdot \xi + c_w (T_N - T_{\text{melt}})\right]. \tag{4.13}$$

4.4. Граничные условия для влагопереноса на внешней поверхности

Для уравнения влагопереноса на внешней поверхности также необходимо задать условие, описывающее испарение влаги в атмосферу:

$$-D_N \frac{\partial w_N}{\partial n} = \beta(V, \varepsilon_N)\left(\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}\right) + \dot{m}_{\text{snow}}, \qquad \boldsymbol{x} \in \Gamma_{\text{outer}}, \tag{4.14}$$

где $\dot{m}_{\text{snow}}$ – поток тающего снега на поверхности (кг/(м²·с)). В отсутствие снега последним членом можно пренебречь.

4.5. Обобщённое граничное условие

Комбинируя (4.7), (4.9), (4.11) и (4.13), получаем общее выражение для теплового потока на внешней поверхности:

$$q_{\text{total}} = h(T_N - T_{\text{air}}) + \varepsilon_s \sigma \left(T_N^4 - T_{\text{sky}}^4\right) + L_v \beta \left(\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}\right) + \dot{m}_{\text{precip}}\, \Delta H, \tag{4.16}$$

где ΔH – энтальпия, необходимая для нагрева/плавления осадков.

Это уравнение является нелинейным относительно T_N из-за наличия члена T_N^4 и зависимости $\rho_{v,s}(T_N)$. В численной реализации оно решается итерационно на каждом временном шаге.

Заключение

Разработанная математическая модель позволяет прогнозировать деградацию теплозащитных свойств многослойной перчатки под совместным действием механического сжатия, увлажнения и ветра. Численный анализ выявил, что сжатие утеплителя на 30 % снижает его эффективное тепловое сопротивление на 25–40 % в зависимости от структуры материала, а умеренное увлажнение (влагосодержание 0,2–0,3) добавляет ещё 15–25 % потерь. При более высоком влагосодержании (свыше 0,6) изоляционная способность падает более чем вдвое. Наиболее важным результатом является обнаруженный синергетический эффект: совместное действие сжатия ($\varepsilon = 0{,}3$) и увлажнения ($w = 0{,}5$) вызывает падение сопротивления на 55–60 %, что значительно превышает сумму независимых эффектов (около 40–45 %). Такое неаддитивное усиление теплопотерь объясняется уменьшением пористости при сжатии, способствующим образованию сплошных водяных «мостиков холода», и количественно описывается мультипликативной моделью эффективной теплопроводности.

Основные ограничения модели связаны с пренебрежением замерзанием влаги при отрицательных температурах и отсутствием учёта циклических деформаций, которые могут вызывать необратимую потерю теплоизоляции. Дальнейшие исследования должны включать экспериментальную параметризацию для конкретных материалов, верификацию на тепловом манекене с имитацией рабочих движений, а также расширение модели на случай фазового перехода вода–лёд и вязкоупругого поведения утеплителя. Предложенный подход формирует основу «цифрового двойника» теплозащитной перчатки. Модель интегрирует современные представления о тепломассопереносе в пористых средах, механике деформируемых материалов и климатических воздействиях. Её внедрение на предприятиях, выпускающих специальную экипировку, позволит перейти от эмпирического проектирования к научно обоснованному, сократить время и стоимость разработки, а главное – обеспечить надёжную защиту рук человека при работе в экстремальных условиях Арктики.

Литература

1. Zhang H. The effects of moisture on the thermal protective performance of firefighter protective clothing under medium intensity radiant exposure / H. Zhang, G. Song, J. Cao // Textile Research Journal. – 2017. – Vol. 88, is. 8. – DOI: 10.1177/0040517517690620.

2. Havenith G. Clothing ventilation, vapour resistance and permeability index: changes due to posture, movement and wind / G. Havenith, R. Heus, W.A. Lotens // Ergonomics. – 1990. – Vol. 33, no. 8. – P. 989-1005. – DOI: 10.1080/00140139008925308.

3. Gibson P.W. Application of nanofiber technology to nonwoven thermal insulation / P.W. Gibson, C. Lee, F. Ko, D. Reneker // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2007. – Vol. 2, no. 2. – P. 32-40. – DOI: 10.1177/155892500700200204.

4. O'Callaghan P.W. Effect of thermal contact resistance on the performance of transformer lamination stacks / P.W. O'Callaghan, A.M. Jones, S.D. Probert // Applied Energy. – 1977. – Vol. 3, no. 1. – P. 3-12. – DOI: 10.1016/0306-2619(77)90004-6.

5. Whitaker S. Simultaneous heat, mass, and momentum transfer in porous media: A theory of drying // Advances in Heat Transfer. – 1977. – Vol. 13. – P. 119-203. – DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70223-5

6. Kuklane K. Protection Against Cold in Prehospital Care – Thermal Insulation Properties of Blankets and Rescue Bags in Different Wind Conditions / K. Kuklane, I. Holmér// European Journal of Applied Physiology. – 2012. – No. 24(5) – Art. 408–15. – DOI: 10.1017/S1049023X00007238

7. Chen Y. Clothing Thermal Insulation During Sweating / Y. Chen, J. Fan, W. Zhang // Textile Research Journal. – 2003. – Vol. 73, is. 2. – P. 152-157. – DOI: 10.1177/004051750307300210

8. Kanat E. Modelling thermal resistance of woven fabrics in wet state // Industria Textila. – 2025. – No. 76(01). – P. 3-10. –DOI: 10.35530/IT.076.01.2024134.

9. Ferry J.D. Viscoelastic Properties of Polymers. – 3rd ed. – New York: Wiley, 1980.

10. O'Callaghan P.W. An Improved Thermal Contact Resistance Rig / P.W. O'Callaghan, S.D. Probert // Applied Energy. – 1972. – No. 5(8). – P. 311-316. – DOI: 10.1177/002029407200500801

11. Alsabry A. Dependencies for determining the thermal conductivity of moist capillary-porous materials / A. Alsabry, B. Backiel-Brzozowska, V.I. Nikitsin // Energies. – 2020. – Vol. 13(12). – Art. 3211. – DOI: 10.3390/en13123211.

12. Sukigara S. Dependence of thermal contact properties on compression pressure / S. Sukigara, S. Jiang, H. Shen // Journal of Textile Engineering. – 2017. – Vol. 73, is. 8. – P. 177-181. – DOI:10.2115/fiberst.2017-0024.

13. Fohr J.P. Dynamic heat and water transfer through layered fabrics / J.P. Fohr, D. Couton, G. Treguier // Textile Research Journal. – 2002. – Vol. 72, no. 1. – P. 1-12. – DOI: 10.1177/004051750207200101.

14. Gibson P.W. Effect of temperature on water vapor transport through polymer membrane laminates // Polymer Testing. – 2000. – No. 19(6). – P. 673-691. – DOI: 10.1016/S0142-9418(99)00040-9.

15. Lee S. Statistical modeling of water vapor transport through woven fabrics / S. Lee, K. Obendorf // Textile Research Journal. – 2012. – No. 82(3). – P. 211-219. – DOI: 10.1177/0040517511433145.

16. Liu C. A hyperelastic constitutive model accounting for tension-shear coupling in preforming modelling of 3D woven fabrics / C. Liu, Y. Zhu, Y. Hu, H. Cheng, K. Zhang, R. Bai, B. Liang // Chinese Journal of Aeronautics. – 2025. – DOI: 10.1016/j.cja.2025.104037.

17. Defraeye T. Convective heat transfer coefficients for exterior building surfaces: Existing correlations and CFD modelling / T. Defraeye, B. Blocken, J. Carmeliet // Energy Conversion and Management. – 2011. – Vol. 52, no. 1. – P. 512-522. – DOI: 10.1016/j.enconman.2010.07.026.

18. Morrissey M.P. The effect of wind, body movement and garment adjustments on the effective thermal resistance of clothing with low and high air permeability insulation / M.P. Morrissey, R.M. Rossi // Textile Research Journal. – 2013. – Vol. 84, no. 6. – P. 583-592. – DOI: 10.1177/0040517513499431

19. Kays W.M. Convective Heat and Mass Transfer. – 3rd ed. / W.M. Kays, M.E. Crawford. – New York: McGraw-Hill, 1993.

20. Bird R.B. Transport Phenomena. – 2nd ed. / R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. – New York: Wiley, 2002.

21. Yovanovich M.M. Four decades of research on thermal contact, gap, and joint resistance in microelectronics // IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. – 2005. – Vol. 28, no. 2. – P. 182-206. – DOI: 10.1109/TCAPT.2005.848483.

22. O'Callaghan P.W. Thermal resistance of pressed contacts / P.W. O'Callaghan, S.D. Probert, B. Snaith // Applied Energy. – Vol. 22, – is. 1, – 1986, – P. 31-84. – DOI: 10.1016/0306-2619(86)90073-5.

23. Modest M.F. Radiative Heat Transfer. – 3rd ed. – New York: Academic Press, 2013. – 882 p.

24. Parsons K.C. Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2014. – 558 p. – DOI:10.1201/b16750.

25. Smith C.J. Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise induced hyperthermia / C.J. Smith, G. Havenith // European Journal of Applied Physiology. – 2010. – Vol. 111, No. 7. – P. 1391-1404. – DOI: 10.1007/s00421-010-1744-8.

DOI: 10.24892/RIJIE/20260311

Mathematical Modeling of Thermal Protective Properties of Multilayer Textile Products for Artic Conditions

Yashin S.R., Baranov I.V.
ITMO University
Saint-Petersburg, Russian Federation
yashins27@mail.ru, barigor@mail.ru

Abstract. **Abstract. Existing standard methods for assessing the thermal performance of Arctic gear fail to account for the combined effects of mechanical compression, moisture, and wind, leading to an overestimation of the actual performance of the products. The aim of this study is to develop a mathematical model that predicts the transient temperature field in a multilayer glove, taking into account the combined effects of these operational factors. The model is based on a conjugate system of equations for thermal conductivity (including the heat of moisture phase transitions), moisture transfer in a porous medium, and quasi-static mechanical equilibrium. This paper proposes for the first time a multiplicative approach to describing effective thermal conductivity as a function of deformation, moisture content, and temperature, based on a synthesis of experimental data. To close the system, the following constitutive relations were introduced: the Mooney-Rivlin hyperelastic model for large insulation deformations, empirical pressure dependences of the coefficients of moisture conductivity and contact thermal resistance, and criterion equations for convective heat and mass transfer on the outer surface, taking into account wind. The model serves as the basis for creating a digital twin of the thermal glove and enables the transition from empirical design to scientifically based optimization of equipment for extreme climatic conditions.**

Keywords**: mathematical modeling, thermal insulation properties, multilayer textile materials, arctic conditions, heat and mass transfer.**

Библиографическое описание статьи

Яшин С.Р. Математическое моделирование теплозащитных свойств многослойных текстильных изделий для арктических условий / С.Р. Яшин, И.В. Баранов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №3. – С. 65-70. DOI: 10.24892/RIJIE/20260311

Reference to article

Yashin S.R., Baranov I.V. Mathematical modeling of thermal protective properties of multilayer textile products for artic conditions, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.3, pp. 65-70. DOI: 10.24892/RIJIE/20260311